Klima
– processer og sammenhænge

Af Marit-Solveig Seidenkrantz, Centre for Past Climate Studies, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet

Der er særdeles stor opmærksomhed på klimaforandringer, ikke mindst de menneskeskabte. Vi ved, at klimaet altid har været under forandring, og at skiftende istider, varierende vind- og havstrømme og meget store nedbørs-variationer har betydet enorme klimatiske forskelle mellem de forskellige perioder i klodens historie. Dermed har klimaet givet markant ændrede betingelser for livet gennem forskellige tidsperioder, og klimaet er fortsat en af de vigtigste faktorer, der kontrollerer planters, dyrs og menneskers livsbetingelser – nu og i fremtiden. Hvis vi vil forstå de nuværende klimafor-andringer og komme med kvalificerede forudsigelser af fremtidens klima, har vi behov for at kende årsagerne til klimaforandringer.

FOTO: CARSTEN BRODER HANSEN

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

Måling af vejr og klima

"Vejr" karakteriserer forholdene på et givet sted og et givet tidspunkt, mens "klima" svarer til det gennemsnitlige vejr på dette sted. Klimaet beskrives både ved det gennemsnitlige vejr (temperatur, nedbør, luftfugtighed, solskinstimer og vind m.v.) og gennem de variationer, der forekommer i vejret. En ændring i klimaet betyder dermed en ændring i det fremherskende vejr. Variationerne i jordens klima er resultat af et kompliceret samspil mellem naturlige processer styret af en lang række mekanismer. Den vigtigste mekanisme er relateret til energien fra solen, idet denne variation i energitilførslen påvirker de fleste klimastyrende processer såsom havstrømme, vindsystemer, nedbør og gletcherdannelse. Men der er også mekanismer, der er helt eller delvist uafhængige af solen, såsom kontinenternes placering og mængden af drivhusgasser i atmosfæren. De fleste videnskabsfolk mener, at netop i kraft af drivhusgassernes betydning har menneskets aktiviteter fået afgørende og potentielt katastrofal indflydelse på fremtidens klima.

De klimastyrende processer undersøges i dag bl.a. ved målinger af de nutidige forhold (f.eks. vejret), men da klimaet jo varierer, er det også nødvendigt at se på ændringer over tid. Det er kun de sidste ca. 150 år, at man har kunnet foretage instrumentelle målinger af temperatur og nedbør, og det betyder, at den statistiske sikkerhed af analyser af selv kortvarige klimafluktuationer på få årtier er ret lav, hvis man udelukkende ser på instrumentelle data. Længerevarende klimavariationer, der strækker sig over århundreder eller mere, kan man naturligvis stort set ikke belyse gennem de eksisterende instrumentelle analyser. Derfor er undersøgelser af fortiden helt central for at forstå klimaet, og med data fra jordens geologiske historie kombineret med computermodeller, kan vi følge klimaforandringer gennem lang tid og opnå viden om de mekanismer, der styrer klimaet.

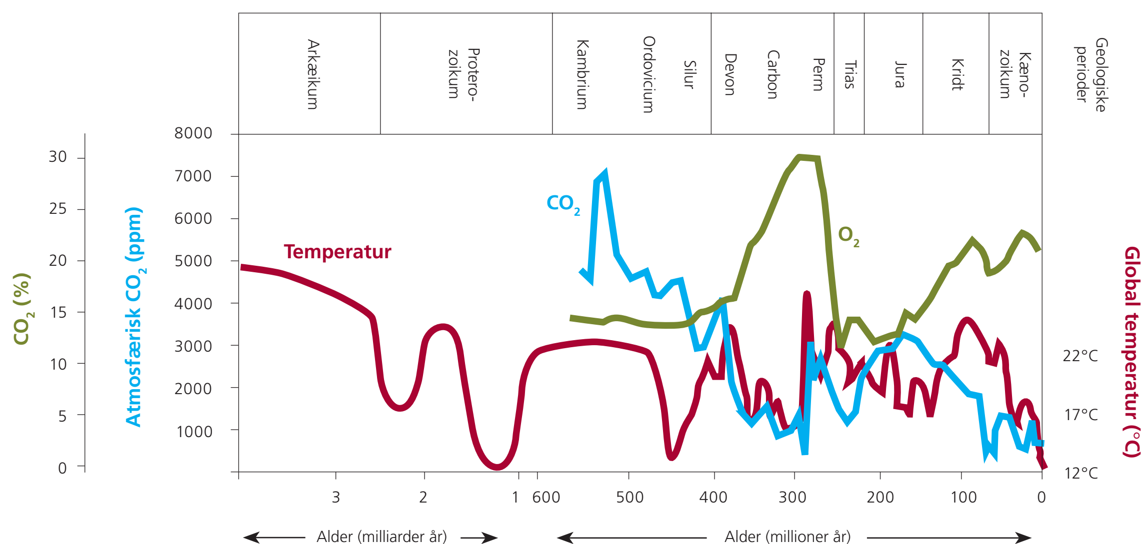
Drivhuseffekten og de menneskeskabte ændringer

Drivhuseffekten opstår fordi jordens atmosfære tilbageholder en del af den varme, som ellers ville forsvinde fra jorden ud i verdensrummet. Hvis drivhuseffekten er høj, stiger ligevægtstemperaturen på jorden. Med atmosfærens nuværende sammensætning er den stabile ligevægtstemperatur på jordens overflade 15 °C, men ville være -18 °C, hvis der ikke var nogen atmosfære. Uden drivhusgasserne vil solens energi ikke kunne blive holdt tilbage i Jordens atmosfære, og Jorden ville have været en frossen klode. Atmosfærens indhold af drivhusgasser er således en nødvendig forudsætning for livet. 50% af drivhuseffekten skyldes vanddamp (H_2O), 25% kuldioxid (CO_2), 7% metan (CH_4) og 3% lattergas (N_2O), mens nogle CFC gasser har en mindre effekt.

Afbrænding af fossile brændstoffer kombineret med animalsk produktion (f.eks. kvæg) har givet en stigning på omkring 33% af atmosfærens indhold af kuldioxid (CO_2) i forhold til præindustrielt niveau, mens metan (CH_4) og lattergas (N_2O) er øget med henholdsvis ca. 150% og 16%. Gennem de seneste godt 100 år er drivhuseffekten således øget, hvilket har skabt udtalt bekymring. Specielt gennem de seneste årtier ser det ud til, at drivhusgasserne har haft betydelig indflydelse på klimaet.

Naturlige processer

Ud over den menneskelige påvirkning er der også vigtige naturlige processer, der påvirker atmosfærens indhold af drivhusgasser. Sammensætningen af jordens atmosfære, som oprindelig blev skabt ved afgasning af kvælstof, vanddamp og kuldioxid fra jordens skorpe, er blevet ændret i takt med, at der blev dannet fri ilt ved fotosyntese. Samtidig har vulkansk aktivitet i betydeligt omfang påvirket mængden af drivhusgasser, specielt CO_2. Som følge af dette, er der sket store klimatiske ændringer på Jorden siden den blev skabt for 4,6 mia. år siden, og dannelsen af fri ilt har desuden medført udvik-



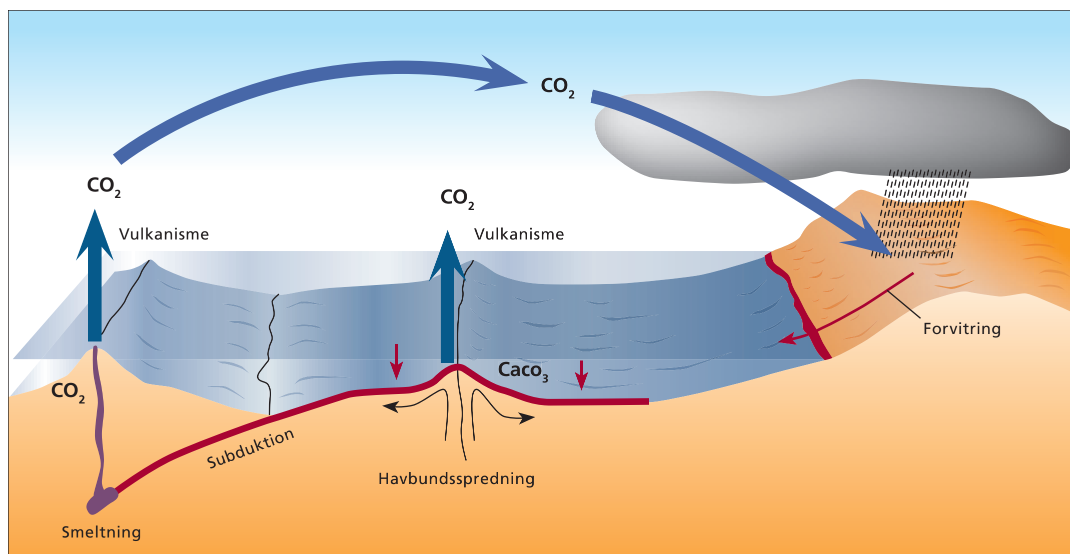
Figur 1 Estimat over ændringer i den gennemsnitlige, globale temperatur (rød kurve), samt atmosfærens indhold af CO_2 (i ppm = milliontedele; blå kurve) og ilt (O_2, grøn kurve) i procent gennem de sidste 3,9 milliarder år af Jordens historie. Læg mærke til skift i tidsskala. Af figuren ses, at klimaet i dag faktisk er koldere end gennemsnitligt for Jordens historie, og indholdet af drivhusgasser som f.eks. kuldioxid er ligeledes forholdsvist lavt. Data er behæftet med betydelig usikkerhed. Fra Seidenkrantz 2009 (Geografiske Orientering vol 5).

lingen af helt nye typer af organismer, som er afhængige af denne ilt. Også variationer i mængden af plantevækst samt planternes indflydelse på den kemiske forvitring har haft betydning for atmosfærens CO_2 indhold. Et betydeligt fald i CO_2 i sen Silur og Carbon (se Figur 1) menes således i høj grad at være influeret af opståen af højere planter. Mange af verdens store kul-forekomster stammer netop fra Carbon (Kultiden). Disse naturlige processer forårsager dog som oftest mere gradvise og langsomme ændringer end de der er observeret i nyere tid - specielt siden afslutningen af Anden Verdenskrig.

Pladetektonikkens indflydelse på klimaet

Klimaet har varieret meget gennem Jordens historie (Figur 1). Der har været perioder, hvor gletschere (iskapper) bredte sig over store dele af kontinenterne (istider), og andre perioder, hvor der end ikke var is på de højeste bjergtinder. Disse klimaændringer har været meget omfattende, men er foregået meget langsomt over millioner af år. Årsagen til disse klimaændringer i stor skala skyldes i væsentligt omfang forandringer i kontinenternes placering samt hastigheden af, hvor hurtigt de tektoniske plader har bevæget sig i forhold til hinanden.

De betydelige naturlige variationer i atmosfærens indhold af drivhusgasser skyldes i høj grad netop pladetektonikken, da der ved stor tektonisk aktivitet vil være mange vulkanudbrud, hvorved der bl.a. frigøres CO_2 til atmosfæren (Figur 2). Et eksempel er Kridttiden, hvor Atlanterhavet blev dannet. På dette tidspunkt var vulkanismen så kraftig, at der blev udledt store mængder drivhusgasser, og indholdet af CO_2 i atmosfæren var ca. 10 gange så højt som i dag (Figur 1). Af den årsag menes den globale gennemsnitstemperatur i kridttiden at have været 10-15 grader højere end i dag.



Figur 2 Atmosfærens naturlige indhold af CO_2 bestemmes bl.a. af de pladetektoniske processer. Øget vulkanisme betyder større udledning af CO_2 mens øget forvitring i forbindelse med bl.a. bjergkædedannelse vil fjerne CO_2 fra atmosfæren. Fra Seidekrantz 2009 (Geografiske Orientering vol 5).

I perioder, hvor vulkanisme er mindre udtalt og de tektoniske plader bevæger sig langsommere, vil der slippe relativt mindre CO_2 ud til atmosfæren, og CO_2 indholdet vil derfor langsomt falde. Indholdet af CO_2 i atmosfæren vil ligeledes falde i perioder, hvor to eller flere kontinenter støder sammen, da dette forårsager bjergkædedannelse. Unge bjergkæder betyder, at frisk materiale konstant er tilgængelig for kemisk forvitring, og under denne kemiske forvitring bruges den frie CO_2 fra atmosfæren i forbindelse med omdannelse af visse bjergarter til kalk ($CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2$). Det er netop på grund af dannelsen af Himalaya bjergene, Alperne og Andesbjergene m.m. og det deraf følgende relativt lave indhold af CO_2 i atmosfæren, at Jordens klima i dag er koldere, end det har været gennemsnitligt over Jordens historie.

Dannelse af nye bjerge frigiver materiale, som kan forvitres under forbrug af fri CO_2. Jordens klima er i dag koldere end gennemsnitligt for Jordens hidtidige historie blandt andet på grund af unge bjergkæder som Alperne, Himalaya og Andes. På billedet ses vulkanen La Cumbre på Galapagos-øerne. En ung og særdeles aktiv vulkan, der sidst var i udbrud i 2009

FOTO: CARSTEN BRODER HANSEN



Kontinenternes bevægelser og klodens istider

Selve placeringen af kontinenterne kan også påvirke klimaet, da deres placering har betydning for havstrømmenes og vindenes forløb. Et eksempel er den globale nedkøling, der er foregået de sidste ca. 35 millioner år. Denne nedkøling kædes til dels sammen med løsrivelsen af Antarktis fra Sydamerika og Australien, der har muliggjort dannelsen af en havstrøm, som strømmer rundt om Antarktis og isolerer kontinentet, så de varme vandmasser fra Sydatlanten og Stillehavet ikke kan påvirke klimaet på Antarktis. Siden løsrivelsen er Antarktis gradvist blevet koldere, og består nu overvejende af en tyk iskappe, der har påvirket hele jordens klima, både ved at isen reflekterer en stor af solens indstråling og på grund af ændringer i havstrømmenes forløb.

Store iskapper dannes på landområder på eller nær ved en af polerne, da opbygningen af en iskappe starter, hvor det er koldest. Selve isopbygningen foregår på land eller på vanddybder mindre end ca. 50 m, og derfor falder klodens istider sammen med de tidspunkter, hvor der har været landmasser på eller nær en af polerne. I lange perioder af de sidste 700 millioner år har de største landmasser været koncentreret på den sydlige halvkugle, og det er kun for forholdsvis nyligt, at hovedparten af landmasserne er rykket tættere på Nordpolen. Under tidligere tiders istider var det således overvejende de sydlige landområder, der var dækket af is, mens det under de sidste istidsperioder (de sidste 2-3 millioner år) har været landmasser på den Nordlige halvkugle, der har været dækket af is. Kontinenternes placering bestemmer således både muligheden for isdække men også placeringen af iskapper.

Istider og mellemistider – på vej mod en ny istid?

Klimaet er langsomt blevet koldere gennem de sidste godt 35 millioner år, men for 2,6 millioner år siden kom et brat skifte, der hurtigt gjorde klimaet betydeligt koldere. Samtidigt dannedes større iskapper på den nordlige halvkugle. Det var startskuddet til en periode præget af vekslende istider og mellemistider, og jordens gennemsnitstemperatur har siden varieret fra 5 til 8 °C. I de varmere perioder (mellemistider) har iskapperne overvejende begrænset sig til Antarktis og Grønland. Der har sandsynligvis været så mange som 40 istider, adskilt af lige så mange mellemistider i de sidste godt 2 millioner år. Under en del af disse istider, specielt de seneste, som har været ekstreme, har isen bredt sig ud over store dele af den nordlige halvkugle. Vi lever i øjeblikket i en mellemistid, der startede for ca. 11.700 år siden.

Ændringer i klimaet fra istid til mellemistid tilskrives i høj grad ændringer i solens indstråling, forårsaget af variationer i jordaksens hældning og retning samt Jordens bane omkring Solen (se Figur 3A og 3B). Dette kaldes Milankovitch-teorien efter den serbiske astronom Milutin Milankovitch. Solens indstråling kan beregnes både for fortid og fremtid, og derfor kan vi også estimere om og, i givet fald, hvornår en ny istid vil begynde. Det er jordens hældning, som forårsager årstiderne. Hvis jordens akse ikke hældede, var der næsten ingen variation mellem årstiderne. En større vinkel på aksehældningen giver varmere somre og koldere vintre både på den nordlige og sydlige halvkugle, mens indstrålingen på høje breddegrader øges i forhold til indstrålingen på lave breddegrader.

Indlandsisen ved Kangerlussuaq (Søndre Strømfjord) i Grønland. I de varmere perioder (mellemistider) har iskapperne overvejende begrænset sig til Antarktis og Grønland. Læg mærke til manden nederst i venstre hjørne.


FOTO: CARSTEN BRODER HANSEN

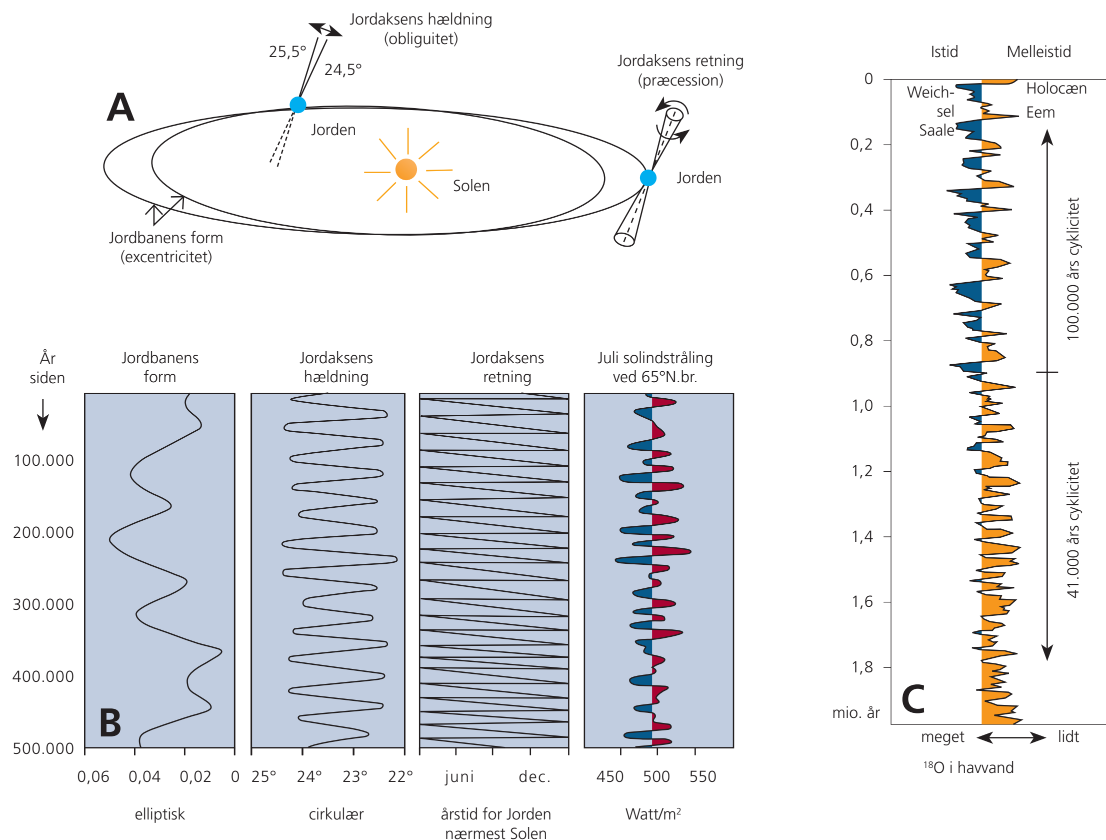
Jordbanens form – excentriciteten

Jordens bane omkring Solen danner som bekendt en ellipse; men formen af denne ellipse varierer gennem tiden fra næsten cirkelformet til en noget fladere ellipse pga. påvirkninger (tyngdekraften) fra solsystemets andre planeter. Jordbanens ellipticitet kaldes excentriciteten, og ellipsen varierer med cykliciteter på ca. 100.000 og 400.000 år (se Figur 3A og 3B).

I dag er der ca. 3% forskel i afstand fra Jorden til Solen mellem den tætteste og den fjerneste position. Jorden befinder sig tættest på Solen den 3. januar, altså tæt på den nordlige halvkugles vintersolhverv (21. december). Det betyder, at både vintrene på den nordlige halvkugle og somrene på den sydlige halvkugle er lidt varmere, end de ville have været, hvis jordens bane havde beskrevet en perfekt cirkel. Da jorden er længst væk fra solen den 4. juli, nær sommersolhverv (21. juni), er somrene på den nordlige halvkugle og vintrene på den sydlige halvkugle tilsvarende lidt koldere. Dette giver i dag lidt mindre sæsonforskel på den nordlige end den sydlige halvkugle, da den nordlige halvkugle rammes af mindre sollys om sommeren og mere om vinteren end de tilsvarende årstider på den sydlige halvkugle. Effekten af Jordens elliptiske bane på årstiderne er dog ret lille, idet den kun forstærker eller formindsker solindstrålingen med få procent. Excentricitetens største betydning ligger i dens indvirken på præcessionen, idet præcessionen har større betydning, når jorden er mere elliptisk.



FOTO: CARSTEN BRODER HANSEN



Figur 3 Ændringer i Solens indstråling sammenlignet med klimakurve for de sidste 2 millioner år.
A og B: Periodiske ændringer i Jordens bane omkring Solen og jordaksens hældning påvirker hinanden, således at solindstrålingen følger forskellige cykliske variationer, der påvirker hinanden og danner et kompliceret mønster. Kurverne viser beregninger af jordbanens form (excentricitet) og jordaksens hældning (obliquitet), jordaksens retning (præcession) samt den deraf resulterende solindstråling ved 65° N.br. gennem de sidste 500.000 år. Excentriciteten er udtrykt ved sammenpresningen af den korte akse i forhold til den lange akse af den elliptiske jordbane. Jordens omdrejningsakse står på skrå i forhold til Jordens bane. Aksens hældning er dog ikke konstant, og den varierer cyklisk med en periodelængde på 41.000 år. Vinklen varierer mellem 22,1° og 24,5°. I dag er den 23,5° og aftagende.

C: Kurven viser variationer i forholdet mellem de to iltisotoper ^{18}O og ^{16}O i havvand gennem Kvartærtidens sidste 2 millioner år. $^{18}O/^{16}O$-forholdet er især afhængig af mængden af indlandsis og er derved et udtryk for den globale temperatur samt mængden af vand, der er bundet i gletcheris. Kurven viser derved de gentagne skift mellem istider og mellemistider. Kuldeperioder, istider, er vist med blåt, mens varmeperioder, mellemistider, er vist med rødt. Fra for 1,8 millioner til for 900.000 år siden varierede klimaet med en periodicitet på 41.000 år, der hænger sammen med variationer i jordaksens hældning (obliquiteten). Efter en overgangsperiode på ca. 200.000 år, har klimamønstret gennem de sidste 700.000 år været præget af 100.000-års cykliciteten i jordbanens form (excentriciteten). Efter Seidenkrantz 1998, 2009.

Jordaksens retning – præcessionen

Jordaksens retning (aksens præcession) samt den elliptiske jordbanes retning (ellipsens precession), hvor det er selve jordens ellipse, der skifter retning, er af meget stor betydning for klimaet (Figur 3A og 3B). Præcessionen har stor betydning for årstiderne, idet den kan få Jordens placering i forhold til Solen under de forskellige årstider til at flytte sig. Da Jorden er nærmest Solen den 3. januar giver det mindre årstidsvariationer på den nordlige end på den sydlige halvkugle. For 11.000 år siden var dette dog modsat, idet Jorden lå tættest på Solen i juni-juli og længst væk fra Solen i december-januar, hvorfor årstidsvariationerne dengang var kraftigst på den nordlige halvkugle. Præcessionen varierer med frekvenser på 23.000 og 19.000 år, i gennemsnit 21.700 år. Den har størst direkte betydning på lave breddegrader og har størst betydning, når jordbanen er mere elliptisk. Disse mekanismer danner tilsammen mønstret for solindstrålingen (Figur 3B). Solindstrålingen er således domineret af præcessionen, specielt på lave og mellemste breddegrader, mens obliquiteten er vigtigere ved højere til mellemste breddegrader. Excentriciteten modificerer kun præcessionens betydning. Størrelsen af ændringer i Solens indstråling vil variere mellem breddegrader samt over året. Generelt vil den mængde solenergi, der rammer Jordens atmosfære, være næsten konstant over tid. Når mindre energi rammer den nordlige halvkugle, vil mere ramme den sydlige og omvendt.

Indstråling bestemmer iskappedannelse

Hvis den gennemsnitlige indstråling om sommeren falder på et givet sted, vil den stige om vinteren. Det kan derfor undre, hvorfor Solens indstråling har så stor betydning for klimaet. Dette skyldes, at det er meget afgørende, hvor og hvornår den maksimale solindstråling falder. Iskapper bliver som nævnt opbygget tæt på polerne, på den nordlige halvkugle omkring 65° N.br., da der her er koldt nok til at isen ikke smelter, men samtidig ikke så koldt, at luften bliver for tør til, at der kan falde nedbør (sne). Samtidig er det sommertemperaturen, der bestemmer, om der kan dannes iskapper, da det er somrenes varme, der afgør, om vinterens sne vil smelte bort. Det har derfor vist sig, at det er den mængde sollys, der rammer Jorden på 65° N.br. om sommeren (juni-juli), der er afgørende for, om vi har istid eller mellemistid.

Hvornår kommer den næste istid?

En istids-mellemistids cyklus har gennem de sidste ca. 700.000 år varet ca. 100.000 år (Figur 3C). Den mekanisme, der umiddelbart ser ud til at have størst betydning for dette, er således excentriciteten (jordbanens form). Dette er dog primært fordi excentriciteten forstærker præcessionens cyklicitet, således at der for hvert 4-5 præcessions minimum (= maksimum i solindstrålingen) vil være et ekstra markant minimum i præcessionen, der danner et markant maksimum i solindstrålingen. Dette kan så starte en ny mellemistid. Tidligere varede en cyklus kun ca. 41.000 år (Figur 3C). Dengang havde jordaksens hældning større betydning, idet skiftene mellem istid og mellemistid fulgte hældningens 41.000 års cyklus. I øjeblikket oplever vi en lav excentricitet (Jordens bane er tæt på cirkulær), således at variationerne i præcession for tiden har mindre indflydelse på klimaet. Dette skyldes indflydelse fra 400.000-års cykliciteten i excentriciteten, der modificerer 100.000-års cykliciteten. Pga. effekten fra 400.000 års cykliciteten i excentriciteten, vil næste istid vil først starte om 20-50.000 år.

Solindstrålingen er dog kun den udløsende faktor, som påvirker andre faktorer. For at finde en mekanisme, der påvirker klimaet mere direkte, skal man først og fremmest se på havstrømmene.

Det er beregnet at næste istid vil starte om 20-50.000 år. På det tidspunkt vil store dele af den nordlige halvkugle se ud som Antarktis gør i dag.


FOTO: CARSTEN BRODER HANSEN

Havcirkulationen – havets klimapumpe

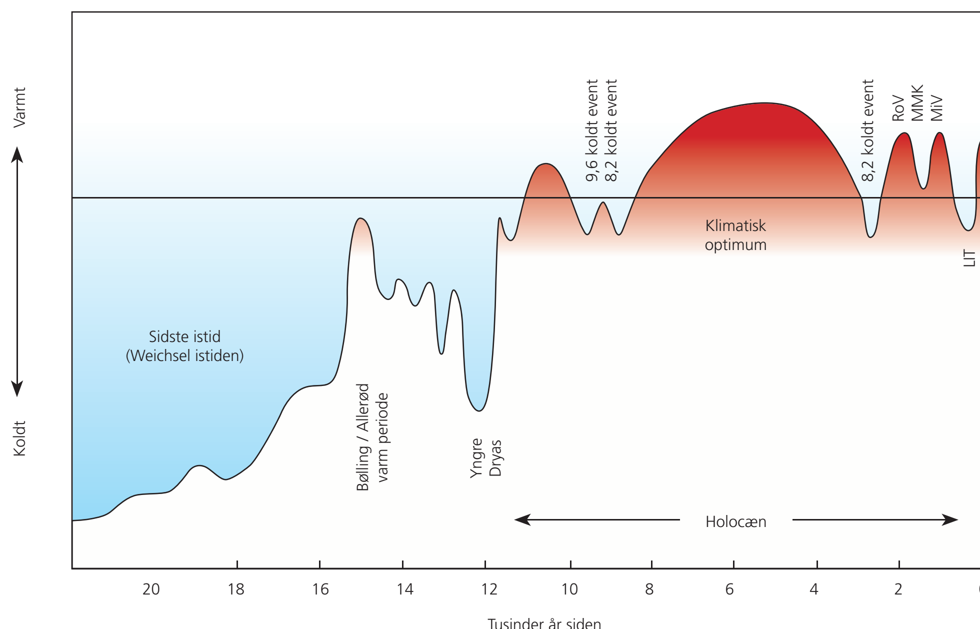
Havstrømmene fordeler energi fra Solen, der hovedsageligt optages ved ækvator. Derfor har oceanerne stor betydning for klimaet på Jordens overflade. I havet nord for Island sker der en stor fordampning. Da saltet naturligvis ikke fordamper, betyder det, at det resterende havvand bliver mere salt. Endnu vigtigere er det, at overfladevandet fryser til is så der dannes havis. Da ferskvand fryser lettere end saltvand, vil havisen ikke kunne indeholde så meget salt (kun op til 7 ‰; mens havvand gennemsnitligt indeholder 35 ‰ salt), og det resterende vand bliver endnu mere saltholdigt. Da vandet er tungere, jo mere salt det indeholder, vil dette havvand synke til bunds. Herved dannes det bundvand, som breder sig i de dybe oceaner, flyder gennem Atlanten, gennem Det Indiske Ocean og ind i Stillehavet, hvor det langsomt opvarmes. Opvarmningen sker samtidigt med vinddreven 'upwelling', og derfor stiger bundvandet til overfladen, hvor det danner et lag af overfladevand.

Da der således forsvinder vand fra Atlanten, må dette jo kompenseres med vand fra andre egne. Det sker med en overfladestrøm fra Stillehavet, der flyder op langs Afrikas kyst og videre gennem Caribien og Den Mexicanske Golf, hvor det opvarmes. Strømmen slår først en stor sløjfe i det centrale Nordatlanten, en effekt der er drevet af vinden. Herefter drejer den over mod Europas kyst og søger nordover. Herved sker der en nettotransport af varmt vand mod nord. Denne varme, nordgående strøm er kendt som Golfstrømmen. Transport af varme fra de subtropiske dele af Atlanten er årsag til det varme klima i Nordvest-Europa. I det vestlige Nordatlanten mødes Golfstrømmen med den arktiske Østgrønlandske Strøm, og det er let at forestille sig, at små ændringer i styrkeforholdene mellem de to strømme kan have stor indflydelse på klimaet.

Det moderne klima – klimasvingninger i historisk tid

Når der i dagpressen tales om den aktuelle globale opvarmning og drivhuseffekten, sammenligner man oftest kun med de sidste ca. 100-150 år. Over denne korte tidsperiode er temperaturen da også steget betydeligt, men hvis man sammenholder det med forholdene tilbage gennem vores nuværende mellemistid, vil man opdage, at klimaet faktisk generelt har svinget meget gennem de sidste 11.700 år (figur 4). Dog har de klimatiske variationer i mellemistiden ikke været nær så kraftige som variationerne mellem istider og mellemistider. Bortset fra den allerførste del af vores mellemistid, hvor afsmeltningen af de store iskapper gjorde klimaet meget ustabilt, var klimaet i begyndelse og specielt i midten af vores nuværende varmtid (Holocæn) et par grader varmere end i dag (Figur 4). Dette skyldes, at sommer-solindstrålingen på den nordlige halvkugle var højere end i dag (relateret til Milankovitch-cykliciteten). Vinter-indstrålingen var dog svagere, så vi havde kraftige årstidsvariationer. Siden er sommer-temperaturen faldet gradvist, specielt gennem de sidste 4-5.000 år, og endnu stærkere de sidste 3.000 år.

Ud over denne generelle tendens, har klimaet haft markante udsving i kortere perioder. Vikingetiden var eksempelvis en varm periode, hvilket gjorde det muligt for Nordboerne at befolke Grønland. Denne "Middelalder Varmtid" blev afløst af en meget kold periode i tidsrummet ca. 1350-1850 e.kr. Den periode er kaldt "Lille Istid", men skal naturligvis ikke forveksles med en "rigtig" istid, selv om kulden havde konsekvenser. Især under de koldeste perioder omkring 1650-1700 satte misvækst og hungersnød ind. Det er her interessant at bemærke, at netop 1850'erne, som var den sidste del af den koldeste periode gennem de sidste 8.000 år, også er det tidspunkt, hvor de systematiske instrumentelle (termometer) målinger af temperaturen begyndte.



Figur 4 Klimaudviklingen over de sidste 22.000 år. RoV = Romers Varmtid, MMK = Mørke Middelalders Kuldeperiode, MiV = Middelalder Varmtid, LIT = Lille Istid.

Ændringer i Solens udstråling i historisk tid

Man har foreslået, at klimasvingninger i Holocæn til dels skyldes ændringer i Solens energiudladning, således at Solen har udsendt mindre energi i kolde perioder end i de varme perioder. Det er blevet påvist, at Solens udstråling faktisk var lav under de koldeste perioder under den Lille Istid (ca. 1350-1850 e.Kr.), mens udstrålingen gennemsnitligt var forholdsvis høj under Middelalder Varmtid (ca. 900-1350 e.Kr.). Dette kan måles gennem undersøgelser af de såkaldte 'kosmogene isotoper' (bl.a. ^{14}C og ^{10}Be), som er ustabile (dvs. radioaktive) nucleider, der dannes i Jordens atmosfære, når atmosfæren bliver bombarderet af kosmisk stråling produceret i forbindelse med supernova-eksplosioner. Under perioder, hvor Solens energieksport er kraftig, vil Solens magnetfelt (~solvinden) delvist beskytte Jorden mod den indkommende stråling, og der vil dannes færre kosmogene isotoper. Hvis Solen er svagere, vil dens beskyttelse også aftage, og flere kosmogene isotoper dannes. Ved at måle mængden af kosmogene isotoper i Jordens aflejringer kan man derfor bestemme, hvor kraftig Solens udstråling har været.

Selvom variationer i Solens energi antageligt spiller en rolle, er det dog også værd at bemærke, at variationerne i Solens energiudladning er ret små, og tidsmæssigt falder variationerne i Solens styrke desuden ikke altid sammen med klimaændringerne. Således skete der et betydeligt temperaturfald og en svækkelse af den nordgående transport af varmt vand (fra Golfstrømmen) i forbindelse med skiftet fra Middelalder Varmtid til Lille Istid omkring 100 år inden faldet i Solens udstråling. Nyere undersøgelser har også peget på, at størrelsen af fluktuationer i Solens energiudladning ikke er konstant, så ændringer i Solens energiudladning har haft større betydning for klimaet i nogle perioder end i andre.


FOTO: COLORBOX

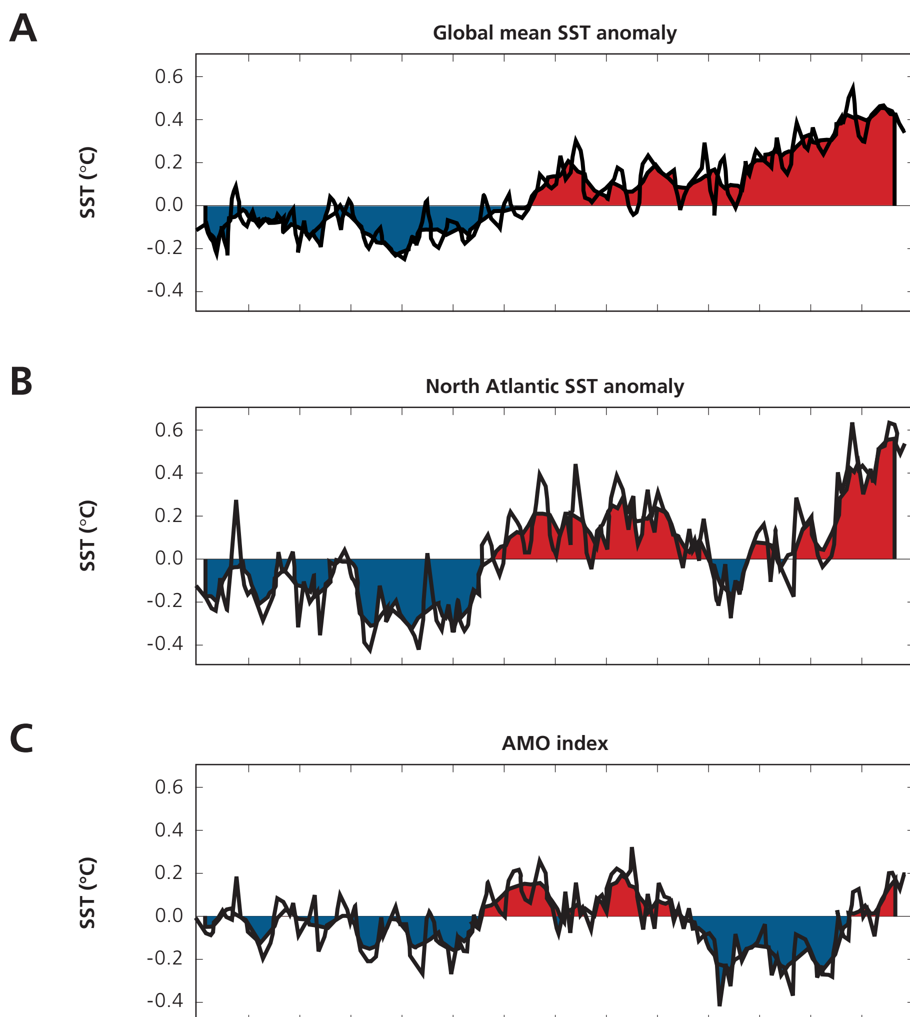
Interne variationer i havet og atmosfæren – AMO

Der findes også mekanismer i Jordens interne klimasystem (havstrømme, vinde), som har stor indvirkning på klimaforandringer. Blandt de vigtigste tæller den såkaldte 'Atlantiske Multidecadiske Oscillation' (AMO), den 'Nordatlantiske Oscillation' (NAO), samt El Niño. De vigtigste mekanismer for klimaet i Danmark og Nordeuropa er AMO og NAO. AMO er defineret ud fra målinger af temperaturen af overfladevandet i Nordatlanten gennem de sidste ca. 140 år. Målingerne viser, at temperaturen af overfladevandet har svinget nogenlunde regelmæssigt mellem kolde og varme perioder (Figur 5). Varigheden af en svingning (en kold plus en varm periode) har ud fra temperaturmålinger hidtil været skønnet til at vare omkring 60-90 år. På grund af den korte serie af måledata har der været usikkerhed om, hvorvidt fænomenet overhovedet var reelt. Ny forskning baseret på geologiske data fra de sidste 8.000 år har dog afdækket, at AMO har eksisteret gennem disse 8.000 år, og haft en cyklicitet på 55-70 år.

Der har også hersket diskussion om AMO's årsag, idet både ændringer i solens energiudladning og i interne variationer i havets cirkulation har været fremsat som forklaringer. Den nye forskning tyder på, at det er overvejende sandsynligt, at AMO'en har været, og fortsat er, drevet af interne svingninger i Atlanterhavets cirkulation – som et badekar der skvulper.

AMO har tilsyneladende en kraftig indflydelse på klimaet i de områder, der støder op til Atlanterhavet. Ud over at påvirke sommertemperaturen i Europa og Nordamerika, spiller AMO en væsentlig rolle for mængden af nedbør i Nordafrika, Nordamerika og Brasilien, samt ikke mindst for forekomsten af ekstremvejr, såsom orkaner i Caribien og det sydøstlige USA. Det faktum, at AMO har kunnet følges 8.000 år tilbage i tid viser, at fænomenet udgør en fast bestanddel af de klimastyrende mekanismer i det atlantiske område. AMO bør inddrages i fremskrivninger af klimaet, idet den vil medvirke til at øge den fremtidige globale opvarmning i de perioder, hvor AMO er i sin positive fase, og temperaturen i Nordatlanten derfor øges naturligt. Til gengæld vil hastigheden af den globale opvarmning i det atlantiske område midlertidigt mindskes i de perioder, hvor AMO er i sin negative fase og temperaturen i Nordatlanten aftager naturligt. Simple fremskrivninger af klimaet i og omkring Nordatlanten tyder på at frekvensen og intensiteten af ekstremvejr vil være nogenlunde konstant frem til ca. 2050, hvorefter de vil øge betragteligt frem mod ca. 2090.

Ved målinger af radioaktive isotoper er det blevet påvist, at solens udstråling var lav under de koldeste perioder under den Lille Istid, mens udstrålingen gennemsnitligt var forholdsvis høj under Middelalder Varmtid.



Figur 5 A) Variationer i den globale overflade-havtemperatur over de sidste 140 år. Kurven viser variationer i den globale middeltemperatur i forhold til middeltemperaturen for perioden 1901-1970. B) Variationer i middeltemperaturen af overfladevandet i det nordatlantiske område. C) Det såkaldte "AMO-index" - beregnet som forskellen mellem middeltemperaturen i Nordatlanten (B) og det globale havtemperatur-trend (A). Den røde farve angiver intervaller, der var relativt varme i forhold til middeltemperaturen for 1901-1970, mens den blå farve angiver relativt kolde intervaller.

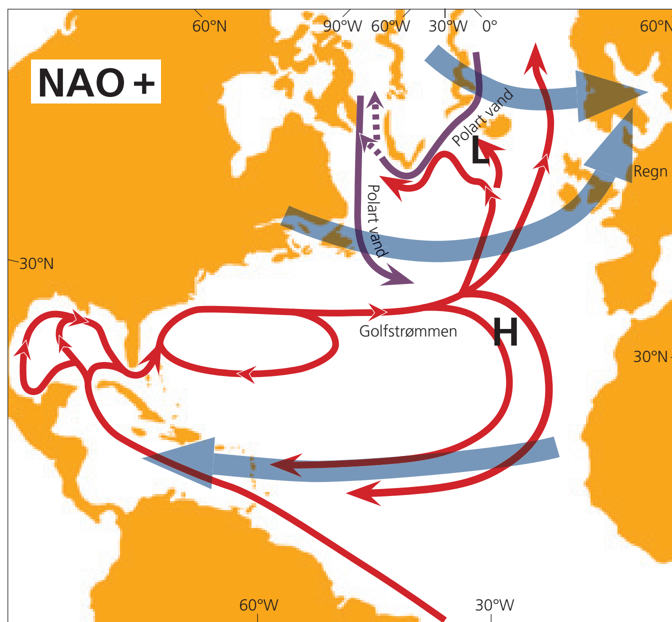
Interne variationer
– Den Nordatlantiske Oscillation (NAO)

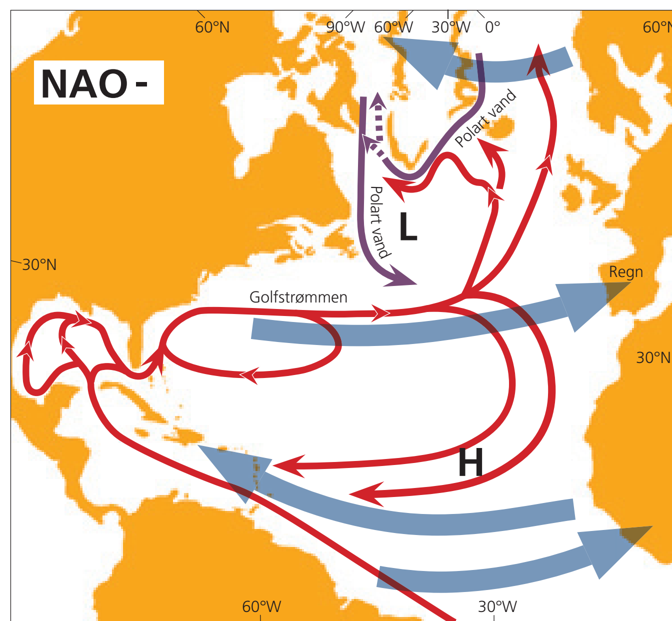
På den Nordlige Halvkugle vil vindene omkring et lavtryk dreje mod uret, mens de bevæger sig med uret omkring et højtryk. Der befinder sig i dag et semi-permanent lavtryk over Island og tilsvarende et højtryk over Azorerne. Dette system betyder en kraftig vestenvind, der bringer varme og fugtighed til Nordvesteuropa. Denne vestenvind er også med til at blæse det varme vand fra Golfstrøm-systemet tættere på Europas kyst, og giver ekstra varme forhold her (dette kaldes en NAO+ situation pga. stor trykforskel; Figur 6A). I nogle perioder vil lavtrykket over Island blive svagere og bevæge sig lidt længere mod syd, mens højtrykket over Azorerne også bliver svagere (kaldes en NAO- situation pga. lille trykforskel; Figur 6B). Det betyder, at vestenvinden bliver svagere og desuden rykker sydover. Samtidigt vil den svagere vind ikke skubbe så kraftigt til vandet fra Golfstrømmen, og mere af det varme vand vil i stedet flyde tilbage mod vest, hvor det vil bevæge sig op langs kysten af Vestgrønland. Under NAO- perioder vil det således blive koldere og mere tørt i Danmark (specielt om vinteren); men det kan også betyde, at klimaet er varmere i Vestgrønland. Dette system varierer fra år til år, men der er længere sammenhængende perioder, hvor klimaet i Nordatlanten overvejende er præget af enten en NAO+ eller en NAO- situation. Den nyeste forskning tyder på, at under den Lille Istid herskede overvejende en NAO- situation, mens Middelalder Varmtid (og den Moderne opvarmning) var præget af NAO+. Hvordan (og hvorvidt) sammenhængen mellem disse interne ændringer i klimasystemet hænger sammen med ændringer i Solens indstråling er endnu usikkert. Det er endnu svært at inddrage betydningen af NAO i beregninger af fremtidens klima på længere sigt, men på kortere sigt (5-10 år) er NAO vigtig for estimeringen af vinterklimaet i den Nordatlantiske region. For eksempel var vintrene 2009/10 og 2010/11 kolde og rige på sne i Europa, mens Grønland oplevede usædvanligt varme vintre. Dette mønster er typisk for NAO-forhold. Den efterfølgende vinter (2011/12) var i modsætning betydeligt varmere i Europa og var et eksempel på et NAO+ år. Dette viser tydeligt, at NAO fænomenet har stor, direkte betydning på både klima og vejrlig.

Menneskeskabte klimaforandringer – det store perspektiv

Jordens klima varierer, og over millioner af år er variationerne ekstreme. Da Jorden blev dannet for omkring 4,6 mia. år siden, var Solens energiudladning omkring 30 % lavere end i dag. Siden er Solen gradvist blevet kraftigere. Hvis man på daværende tidspunkt havde haft en atmosfæresammensætning svarende til den nuværende, ville Jordens gennemsnitstemperatur have været under frysepunktet indtil for 1-2 milliarder år siden, hvor Solens energiudladning havde nået en tilstrækkelig kraft til at opvarme Jorden. Vi ved dog fra geologiske undersøgelser, at der var rindende vand på Jorden meget længere tilbage, og at Jorden således ikke var frosset. Dette var kun muligt, fordi atmosfærens indhold af drivhusgasser var betydeligt højere pga. meget kraftigere vulkansk aktivitet end i dag. Som det fremgår af tidligere afsnit er "normalsituationen" en væsentligt varmere planet end nutidens. Også dele af de sidste 12.000 år, som i geologisk sammenhæng blot er et øjeblik, har været nogle grader varmere end de sidste 150 år, hvor vi for første gang har kunnet foretage systematiske instrumentelle målinger af temperaturen. Ud fra en overordnet betragtning kunne man således hævde, at den aktuelle diskussion om menneskeskabte klimaforandringer er af marginal betydning. De få graders gennemsnitlige temperaturstigninger (i forhold til det nuværende forholdsvist kolde niveau), der sandsynligvis bliver konsekvensen af vores afbrænding af fossile brændstoffer og animalske produktion, vil stadig ikke bringe os op i nærheden af Jordens gennemsnitlige temperatur, hvis man sammenligner med Jordens lange geologiske historie. Der er imidlertid mange andre faktorer, der skal tages i betragtning. Temperaturstigninger vil følges af et hævet havniveau og en større vejrmæssig ustabilitet, dvs. flere ekstreme vejrforhold. Hovedproblemet er, at der i dag lever flere mennesker på jorden end nogensinde tidligere og en meget stor del af disse mennesker lever i og af områder der bliver særligt hårdt ramt af tyfoner, flodbølger og oversvømmelser. Der er dog også potentielt den risiko, at den mindskede havisdannelse og øgede afsmeltning af den grønlandske indlandsis, som den globale opvarming forventes at forårsage, kan mindske styrken af dybvandspumpen og derved betyde en svagere Golfstrøm. Dette kunne betyde et gennemsnitligt temperaturfald i Danmark på 3-6 grader på trods af det ellers globalt set varmere klima.

På meget længere sigt kunne det dog potentielt være interessant, hvis vi kunne lære at styre klimaet – f.eks. ved at 'skrue på' atmosfærens indhold af drivhusgasser. Vi ved nemlig at om 20-50.000 år vil det blive ekstremt koldt og store dele af den nordlige halvkugle vil være ubeboelig, når den næste istid rammer os. Men det har lange udsigter, og lige nu er det vores opgave at lære at klare os uden at øge udledningen af drivhusgasser.



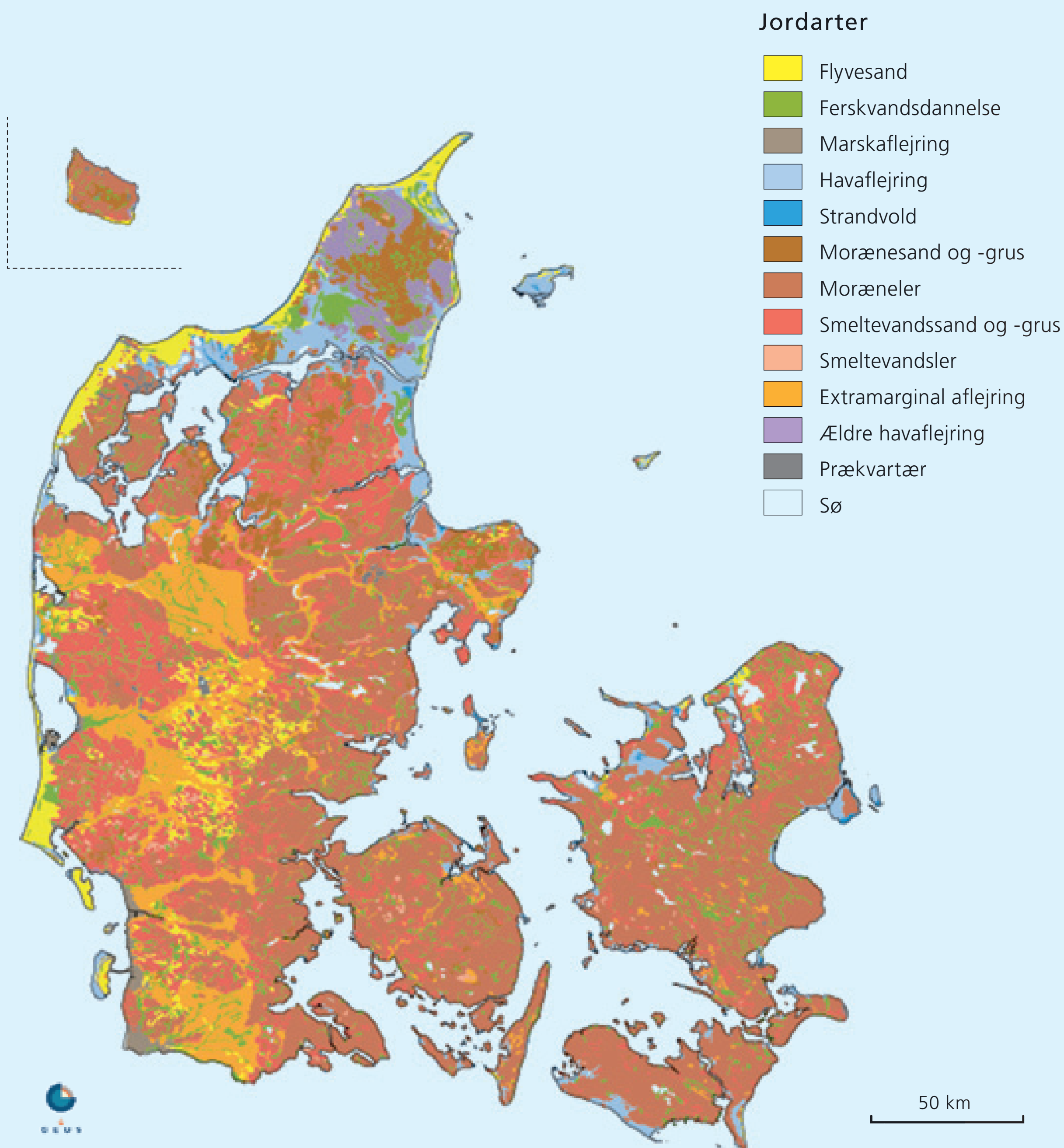


Figur 6 Vores klima er i høj grad påvirket af den Nordatlantiske Oscillation. Kortene viser overfladestrømme i Nordatlanten (røde pile = varmt vand; mørkeblå pile = koldt vand), placering af højtryk (H), lavtryk (L) og vindretninger (lyseblå pile) i Nordatlanten under hhv. NAO+ (øverst) og NAO- (nederst) situationer.




FOTO: CARSTEN BRODER HANSEN

Danmarks jordarter



Kort over de jordarter, der findes i den øverste meter af jordoverfladen. Kortet er resultat af mere end 100 års systematisk geologisk kortlægning.
©GEUS